

УДК 621.391, 528.22

ОБЗОР СОСТОЯНИЯ РАЗРАБОТОК МОБИЛЬНЫХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ И ВРЕМЕНИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КВАНТОВОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ

В.Ф. Фатеев, В.П. Лопатин, В.Г. Пальчиков, В.П. Сысоев

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
fateev@vniiftri.ru,
lopatin@vniiftri.ru

Аннотация. Высокостабильные стандарты частоты и времени могут использоваться для измерения разности гравитационных потенциалов и разности ортометрических высот.

В работе проведён обзор существующих и перспективных мобильных (транспортируемых) отечественных и зарубежных стандартов частоты и времени с нестабильностью 10^{-15} – 10^{-18} , которые могут использоваться в квантовых нивелирах и при создании сети «Квантовый футиток». Приведены сведения о российских и зарубежных экспериментах по релятивистской геодезии, лежащих в основе квантовых нивелиров.

Ключевые слова: квантовый нивелир, стандарт частоты и времени, квантовые часы, оптический стандарт частоты.

REVIEW OF THE STATE OF DEVELOPMENT OF MOBILE TIME AND FREQUENCY STANDARDS FOR SOLVING THE PROBLEM OF QUANTUM LEVELING

V.F. Fateev, V.P. Lopatin, V.G. Palchikov, V.P. Sysoev

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,
fateev@vniiftri.ru,
lopatin@vniiftri.ru

Abstract. Highly stable frequency and time standards can be used to measure gravitational potential differences and orthometric height differences.

The paper reviews existing and prospective mobile (transportable) domestic and foreign time and frequency standards with an instability of 10^{-15} – 10^{-18} , which can be used in quantum levels and when developing the "Quantum footgauge" network. Information about Russian and foreign experiments on relativistic geodesy, which form the basis of quantum levels, is given.

Keywords: quantum level, time and frequency standard, quantum clock, optical frequency standard.

Введение

Известно, что высокостабильные стандарты частоты и времени (СЧВ) могут использоваться для определения разности гравитационных потенциалов и высот [1–4].

Комплекс, измеряющий разность гравитационных потенциалов и соответствующую разность ортометрических высот, включает в свой состав два разнесённых СЧВ и систему измерения рассогласования времени или частоты между ними. Такой комплекс был назван квантовым нивелиром, а сеть квантовых нивелиров предложено назвать «Квантовый футшток» [4].

В Международной глобальной геодезической системе GGOS установлено требование измерения разности гравитационных потенциалов с погрешностью на уровне $10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}^2$. Для достижения такой точности необходимы СЧВ с относительной нестабильностью частоты 10^{-19} , а погрешность измерения разности ортометрических высот точек на поверхности Земли составит при этом 1 мм.

Важнейшей проблемой реализации квантового нивелира и сети «Квантовый футшток» является создание стационарных и мобильных СЧВ с высокой точностью. Использование СЧВ с относительной нестабильностью частоты 10^{-16} , 10^{-17} и 10^{-18} позволяет определять разность ортометрических высот с погрешностью 0,9; 0,09 и 0,009 м соответственно. Для сравнения, погрешность классического нивелирования I класса оценивается в 0,8 мм на 1 км хода [5], то есть на глобальных расстояниях от Кронштадского футштока (3–6 тыс. км) может достигать единиц метров.

В квантовом нивелире для измерения разности гравитационных потенциалов используются два эффекта, предсказанные Эйнштейном [1]: эффект замедления времени в гравитационном поле и, как следствие, эффект гравитационного смещения частоты. Как известно, они оба тесно связаны с разностью ортометрических высот точек на поверхности Земли [2, 3], но имеют разные знаки в зависимости от разности потенциалов. При этом для измерения эффекта гравитационного смещения частоты используются высокоточные стандарты частоты, а для измерения эффекта замедления времени — высокостабильные хранители шкал времени.

Существующие высокостабильные мобильные микроволновые СЧВ (например, водородные, цезиевые и др.) могут использоваться для измерения обоих типов гравитационных эффектов, а создаваемые оптические стандарты частоты (ОСЧ) – лишь для измерения эффекта гравитационного смещения частоты, поскольку оптические хранители времени пока не созданы. Кроме того, ОСЧ пока не могут работать непрерывно в течение продолжительного времени. Вместе с тем на данный момент ОСЧ на основе ансамблей холодных атомов и одиночных ионов превзошли микроволновые стандарты частоты по параметрам относительной нестабильности и точности воспроизведения частоты более чем на порядок величины и продолжают развиваться в сторону улучшения метрологических характеристик. Значения относительной неопределённости и нестабильности лучших стационарных ОСЧ находятся на уровне 10^{-18} , что соответствует неопределённости высоты на уровне 1 см [6].

Мобильные наземные микроволновые стандарты частоты и времени и эксперименты с ними

Перевозимые квантовые часы водородные (ПКЧВ) «Санфир»

Для решения задач сравнения шкал времени удалённых эталонов времени и частоты во ФГУП «ВНИИФТРИ» разрабатываются ПКЧВ на основе компактных водородных стандартов частоты, использующих малогабаритные водородные генераторы (ВГ) с лейкосапфировой накопительной колбой. Колба в виде полого толстостенного цилиндра с крышками устанавливается в центре цилиндрического резонатора ВГ. Вследствие высокой диэлектрической проницаемости лейкосапфира электромагнитное поле концентрируется в области стенок колбы, а малые потери на СВЧ обеспечивают высокую добротность резонатора. Внутренняя поверхность колбы покрывается фторопластом и играет роль накопительного объёма. Всё это позволяет существенно уменьшить размеры резонатора и ВГ в целом при сохранении активного режима работы. Высокостабильный сигнал в резонаторе ВГ частотой 1420,40575 МГц образуется за счёт энергии квантовых переходов атомов водорода, имеющих очень узкую линию излучения. К нему с помощью системы фазовой автоподстройки привязывается частота опорного кварцевого генератора, на основе которого формируют выходные сигналы стандарта частоты 5, 10 и 100 МГц и импульсный сигнал 1 Гц [7]. Для защиты от внешних влияющих на частоту дестабилизирующих факторов резонатор ВГ вакуумирован, окружён четырьмя магнитными экранами и термостатирован в пределах $\pm 0,010$ °С.

Для проведения гравиметрических работ использовались модернизированные перевозимые квантовые часы ПКЧВ-М (2014 года выпуска), состоящие из компактного стандарта частоты водородного СЧВ-М и блока аккумуляторов, установленных на амортизационной платформе (рис. 1). Основные характеристики ПКЧВ-М приведены в таблице 1.



Рис. 1. Внешний вид ПКЧВ-М

Таблица 1

Основные характеристики ПКЧВ-М

Технические характеристики		Значение
Выходные сигналы		5, 10, 100 МГц; 1 Гц
Относительная погрешность по частоте		$\leq \pm 1 \cdot 10^{-13}$
Нестабильность частоты (СКДО) при $\tau_{ц}$:	1 с	$5 \cdot 10^{-13}$
	10 с	$1 \cdot 10^{-13}$
	100 с	$3 \cdot 10^{-14}$
	1 ч	$5 \cdot 10^{-15}$
	1 сут	$4 \cdot 10^{-15}$
Погрешность хранения шкалы времени при транспортировании		2 нс за 24 ч
Температурный коэффициент частоты ТКЧ, 1/°C		$\leq 0,5 \cdot 10^{-14}$

В настоящее время характеристики ПКЧВ существенно улучшились за счёт использования новых технических решений, применения современных электронных компонентов и перевода прибора на цифровую основу. К 2020 году разработаны ПКЧВ нового поколения [8], основные характеристики которых приведены в таблице 2. Цифровая основа прибора позволяет значительно улучшать его характеристики за счёт совершенствования существующего и разработки нового программного обеспечения.

Таблица 2

Основные характеристики ПКЧВ нового поколения

Технические характеристики		Значение
Выходные сигналы		5, 10, 100 МГц; 1 Гц
СКДО выходной частоты в стационарных условиях при времени измерения:	1 с	$2 \cdot 10^{-13}$
	100 с	$1,2 \cdot 10^{-14}$
	3600 с	$1,8 \cdot 10^{-15}$
	24 ч	$2 \cdot 10^{-15}$
Погрешность хранения шкалы времени при транспортировании в течение 24 ч и ходовом времени 12 ч		< 1,5 нс
Погрешность синхронизации внешними импульсами положительной полярности		< 50 нс
Диапазон рабочих температур		+(5–40) °C
Температурный коэффициент частоты		$< 1,5 \cdot 10^{-15}$ 1/К
Магнитный коэффициент частоты		$< 1 \cdot 10^{-15}$ 1/Гс
Время работы от аккумуляторной батареи		< 3 ч

Перебазируемые квантовые часы водородные нового поколения

Перевозимые квантовые часы нового поколения (ПКЧ-Н) (рис. 2) разработки российского предприятия АО «Время-Ч» [9, 10] являются активным водородным СЧВ и предназначены для обеспечения сравнения национальной шкалы времени со шкалой времени системы ГЛОНАСС, а также со шкалами

времени эталонов единиц времени и частоты. Эти часы обеспечивают погрешность хранения шкалы времени не более ± 1 нс на интервале времени наблюдения 1 сутки и при времени транспортирования не более 12 ч. Характеристики нестабильности частоты ПКЧ-Н приведены в таблице 3.



Рис. 2. Внешний вид стандарта частоты и времени ПКЧ-Н

Таблица 3

Характеристики нестабильности частоты ПКЧ-Н

Технические характеристики	Значение	
Нестабильность частоты (СКДО) при τ_n :	1 с	$3 \cdot 10^{-13}$
	10 с	$3 \cdot 10^{-14}$
	100 с	$7 \cdot 10^{-15}$
	3600 с	$4 \cdot 10^{-15}$
	86400 с	$3 \cdot 10^{-15}$

Стандарты частоты и времени Ч1-1007, РЧ-01-Э

Стандарт частоты и времени водородный Ч1-1007 (АО «Время-Ч») относится к классу пассивных водородных СЧВ и предназначен для поверки средств измерений и эталонов времени и частоты на местах их эксплуатации. Данный СЧВ имеет возможность подстраивать свою частоту и шкалу времени по сигналам ГНСС. Обладает нестабильностью частоты на уровне $4,0 \cdot 10^{-15}$ [10].

Стандарт частоты и времени транспортируемый РЧ7-01-Э на базе пассивного водородного СЧВ типа Ч1-76А был разработан ФГУП «ННИПИ КВАРЦ» [11]. СЧВ обладает характеристиками нестабильности частоты на уровне $1,0 \cdot 10^{-14}$ и позволяет проводить сравнение шкал времени территориально разнесённых эталонов времени и частоты с погрешностью не более 10 нс при времени перемещения не более 12 ч.

Вместе с тем в настоящее время отечественные перебазированные микроволновые СЧВ по своим метрологическим характеристикам пока уступают требованиям к перспективным геодезическим средствам квантового нивелирования.

Миниатюрный квантовый стандарт частоты НАП-КПН

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» совместно с ИЛФ СО РАН разработан миниатюрный квантовый стандарт частоты микроволнового диапазона [12, 13] (рис. 3). Для стабилизации частоты используются нелинейные резонансы когерентного пленения населённостей (КПН) в парах рубидия, возбуждаемые в многочастотном поле излучения диодного лазера с вертикальным резонатором. Этот метод возбуждения реперных сигналов является полностью оптическим, не требующим генерации непосредственно микроволнового поля и применения громоздкого СВЧ-резонатора. Основные характеристики стандарта частоты НАП-КПН представлены в таблице 4.



Рис. 3. Внешний вид стандарта частоты НАП-КПН

Таблица 4

Основные характеристики НАП-КПН

Технические характеристики		Значение
Выходные сигналы		5; 10 МГц
Нестабильность частоты (СКДО) при $\tau_{ц}$:	1 с	$3 \cdot 10^{-11}$
	100 с	$9 \cdot 10^{-13}$
	1000 с	$3 \cdot 10^{-13}$
	1 сут	$5 \cdot 10^{-12}$
Объём в корпусе, см ³		60
Время готовности к работе после включения с погрешностью установления действительного значения частоты относительно номинального значения при нормальных условиях $\pm 4 \cdot 10^{-11}$, мин		3

Достигнутая нестабильность частоты стандарта является рекордной для стандартов частоты подобных габаритов и энергопотребления как среди отечественных, так и среди зарубежных аналогов. Вместе с тем, по причине недостаточной стабильности этот СЧВ пока не может использоваться для измерения релятивистских эффектов на Земле и в космосе.

***Российские наземные релятивистские эксперименты
на основе микроволновых СЧВ***

Для проведения релятивистских экспериментов по измерению эффекта замедления времени в ГПЗ и соответствующего измерения разности ортометрических высот наземных точек во ФГУП «ВНИИФТРИ» использованы микроволновые квантовые водородные часы. Для этого созданы два макета квантового нивелира: первый — на основе ПКЧВ «Сапфир» с нестабильностью $4 \cdot 10^{-15}$ и второй — на ПКЧ-Н с нестабильностью $1 \cdot 10^{-15}$. Экспериментальные измерения разности гравитационных потенциалов выполнялись между Государственным эталоном времени и частоты, размещённым во ФГУП «ВНИИФТРИ», и точками на юге Москвы (разность высот — -100 м) [14] и на Кавказе (разность высот — $+1804$ м) [15]. Синхронизация на трассе движения перебазируемого СЧВ и в точках измерений выполнялась с помощью сигналов ГЛОНАСС на основе навигационного приёмника GTR-51. Эксперименты подтвердили ожидаемую величину релятивистского эффекта замедления времени и соответствие измеряемой и фактической разностям высот.

С целью повышения точности сличения временных шкал двух разнесённых СЧВ квантового нивелира авторами предложен и испытан метод релятивистской синхронизации СЧВ. Метод основан на компенсации релятивистских смещений шкалы времени на трассе движения СЧВ по измерениям текущих координат и скорости с помощью бортовой навигационной аппаратуры потребителя (НАП) ГНСС [16]. При длине трассы до 1 тыс. км ожидаемая погрешность метода, определяемая возможностями современной НАП ГНСС в дифференциальном режиме, составляет единицы–десятки пикосекунд.

На основе предложенного метода релятивистской синхронизации экспериментально проверена работа квантового нивелира на эффекте замедления времени без специальной внешней системы синхронизации (ГЛОНАСС и др.) на пути Москва — Нижний Новгород и обратно (разность высот — -65 м) [17]. При нестабильности шкалы времени ПКЧ-Н измеренная высота составила $-59 \pm 9,5$ м, погрешность измерения ограничена нестабильностью ПКЧ-Н.

С помощью ПКЧ-Н на основе метода релятивистской синхронизации проведён эксперимент по повышению точности транспортирования шкалы времени с помощью мобильных СЧВ [18]. При этом квантовые часы перемещались по автомобильной трассе «Москва — Иркутск» на расстояние свыше 5000 км. Погрешность передачи шкалы времени не превысила 150 пс, что существенно лучше, чем при использовании других методов.

Использование свойств квантовых нивелиров открывает возможность создания их распределённой сети «Квантовый футшток», предназначенной для непрерывного мониторинга разности ортометрических высот (геопотенциальных чисел) между удалёнными точками на территории и в акваториях страны. Схема такой системы мониторинга (рис. 4) включает в себя Центральный СЧВ с наивысшей стабильностью 10^{-18} – 10^{-19} , региональные СЧВ, мобильные СЧВ и различные системы синхронизации между ними [2, 4]. Сеть «Квантовый футшток» позволит создать единую высотную основу страны с одинаковой погрешностью определения высоты в любой точке: на островах, в Арктическом регионе и т.п.

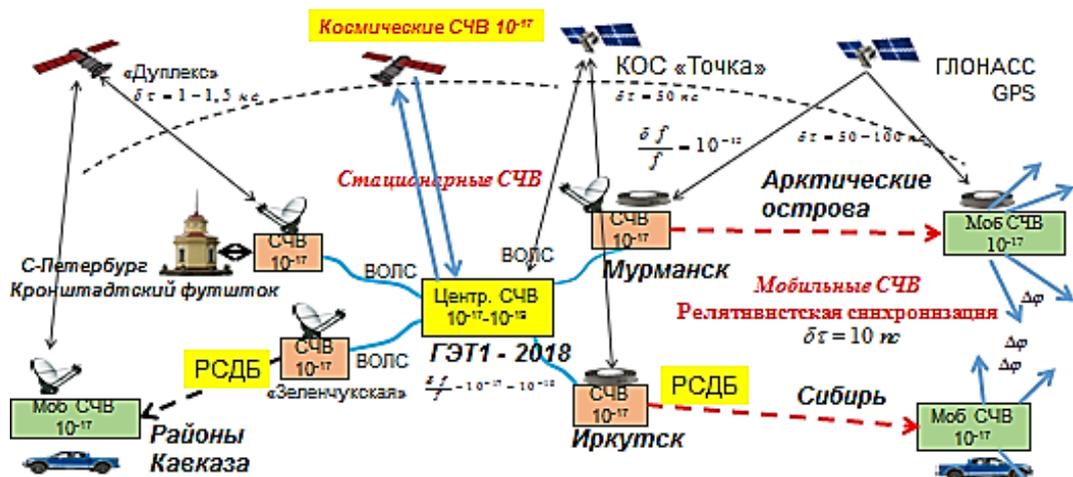


Рис. 4. Схема сети «Квантовый футшток»

Космические релятивистские эксперименты на водородных СЧВ

Релятивистский эксперимент GP-A

Первым космическим экспериментом, посвящённым проверке гравитационного смещения частоты на радиоволнах, был эксперимент группы Vessot R.F.C и др. (1976 г.), известный под названием GP-A [19]. В этом эксперименте сравнивали разность частот двух водородных СЧВ, один из которых размещался на Земле, а второй — на ракете, достигающей в апогее высоты 10 000 км. Синхронизация проводилась с помощью дуплексной радиолинии. Общая продолжительность эксперимента была ограничена двумя часами из-за большого эксцентриситета эллиптической орбиты ракеты. Нестабильность частоты активного водородного СЧВ составляла 10^{-14} на интервале времени 100 с. Эксперимент в целом подтвердил ожидаемые результаты, погрешность измерений характеризовалась неопределённостью 0,014 %.

**Эксперимент в рамках миссии «РадиоАстрон»
с российским водородным СЧВ VCH-1010**

В международной миссии «РадиоАстрон» бортовой водородный СЧВ КА «Спектр-Р» VCH-1010 производства АО «Время-Ч» предназначен для формирования высокостабильного опорного сигнала космического радиотелескопа [20] (рис. 5). СЧВ обеспечивает формирование непрерывной бортовой последовательности секундных импульсов частотой 1 Гц. Выходной сигнал прибора также используется для возбуждения несущей частоты 15 ГГц передатчика высокоинформативного радиоканала, являющегося одновременно фазостабильным каналом для измерения параметров СЧВ. Основные характеристики СЧВ VCH-1010 представлены в таблице 5.



Рис. 5. Внешний вид космического СЧВ VCH-1010 АО «Время-Ч»

Таблица 5

Основные характеристики СЧВ VCH-1010

Параметр		Значение
Номинальные значения частот выходного сигнала		1 Гц, 5 МГц, 15 МГц
Допустимая относительная погрешность прибора по частоте, не более		$3 \cdot 10^{-13}$
Нестабильность частоты 5 МГц, не более:	для интервала 1 с	$3 \cdot 10^{-13}$
	для интервала 10 с	$3 \cdot 10^{-14}$
	для интервала 100 с	$7 \cdot 10^{-15}$
	для интервала 1000 с	$3 \cdot 10^{-15}$
	для интервала 3600 с	$2 \cdot 10^{-15}$
для интервала 1 сутки (с исключением дрейфа)		$5 \cdot 10^{-15}$
Дополнительная относительная погрешность частоты при изменении температуры окружающей среды на 1 °С, не более		$\pm 5 \cdot 10^{-15}$
Дополнительная относительная погрешность частоты при изменении напряжения питания на 1 В, не более		$\pm 2 \cdot 10^{-14}$
Дополнительная относительная погрешность частоты при изменении внешнего магнитного поля на 100 мкТл, не более		$\pm 2 \cdot 10^{-14}$
Масса, кг		60
Габаритные размеры, мм		Ø 460×729

На текущий момент опубликованы только предварительные результаты измерения гравитационного «красного» смещения с помощью космического радиотелескопа «РадиоАстрон» [21, 22], которые не превосходят по точности эксперимент GP-A. Они получены без использования дуплексного режима, в котором зондирующий сигнал генерируется с использованием опорной частоты наземного СЧВ, посылается на спутник и ретранслируется обратно к наземной станции слежения.

Релятивистский эксперимент с использованием бортовых водородных СЧВ навигационных спутников Galileo

Из-за технической неполадки, случившейся во время запуска спутников Galileo 5 и 6 (GSAT0201 и GSAT0202), они были выведены на нерасчётные эллиптические орбиты. Поэтому их было предложено использовать для проверки эффекта гравитационного замедления времени на основе измерения хода их бортовых шкал времени создаваемыми бортовыми водородными СЧВ. В составе каждого спутника имеются по два пассивных высокостабильных водородных СЧВ (PHM-A, PHM-B) (рис. 6) и по два рубидиевых СЧВ (RAFS-A, RAFS-B) [23]. Основные технические характеристики водородных СЧВ PHM-A приведены в таблице 6.

Таблица 6

Основные характеристики СЧВ PHM-A

Параметр	Значение	
Номинальные значения частот выходного сигнала	10,00285741 МГц	
Нестабильность частоты 5 МГц, не более:	для интервала 1 с	$1,8 \cdot 10^{-12}$
	для интервала 10 с	$3,2 \cdot 10^{-13}$
	для интервала 100 с	$7 \cdot 10^{-14}$
	для интервала 1000 с	$2,2 \cdot 10^{-14}$
	для интервала 10000 с	$7 \cdot 10^{-15}$
	для интервала 50000 с	$< 1 \cdot 10^{-14}$
Дополнительная относительная погрешность частоты при изменении температуры окружающей среды на 1 °С, не более	$2 \cdot 10^{-14}$	
Дополнительная относительная погрешность частоты при изменении напряжения питания на 1 В, не более	$3 \cdot 10^{-15}$	
Масса, кг	18,2	
Габаритные размеры, мм	210×500×250	

Перигей орбит спутников составляет 17200 км, а эксцентриситет — 0,156. Спутники изменяют высоту своей орбиты на 8500 км дважды в сутки, что соответствует величине относительного гравитационного смещения частоты бортового задающего генератора СЧВ $\approx 10^{-10}$. Нестабильность частоты водородных СЧВ Galileo на периоде усреднения порядка периода орбиты 12,94 часа составляет $\approx 10^{-14}$. Поэтому из-за периодического изменения высоты орбиты наблюдалась модуляция шкалы времени СЧВ из-за переменного гравитационного эффекта замедления времени на орбите.



Рис. 6. Внешний вид СЧВ PHM-A

В эксперименте требовалось точное знание параметров орбиты спутников. Поэтому для контроля орбиты использовались наземные квантово-оптические системы (КОС) и приёмники сигналов видимых с орбиты навигационных спутников ГНСС. Параметры орбиты спутников и их бортовых шкал времени вычислялись в геоцентрической небесной системе отсчёта (GCRS). Затем вычислялось теоретическое поведение бортовой шкалы времени, рассчитанное с помощью общей теории относительности путём интегрирования координатного времени.

В результате установлено, что размах периодического изменения бортового времени от пика до пика составил 400 нс. Несферичность Земли приводит к периодическому изменению времени в 40 пс с удвоенной орбитальной частотой. Приливные эффекты от Луны и Солнца приводят к периодическому изменению времени около 12 пс от пика до пика. В большинстве измерений присутствовал дрейф порядка 34 мкс/сутки, это обусловлено линейной частью гравитационного замедления ≈ 40 мкс/сутки при номинальной частоте 10,23 МГц и собственным смещением частоты водородного СЧВ, которое обеспечивает дрейф -6 мкс/сутки. Данный линейный дрейф легко вычислялся и удалялся из измерений.

Очевидные выбросы результатов измерений исключались, их объём составлял около 7,7 и 4,3 % от объёма всех данных для GSAT0201 и GSAT0202 соответственно. Анализу подвержены данные измерений за 359 дней по GSAT0201 и данные за 649 дней по GSAT0202 в период с января 2015 по декабрь 2017.

Основными источниками систематической погрешности являются магнитное поле, изменения температуры, а также погрешности определения параметров орбитального движения спутников. На рис. 7 показана разность шкал времени между бортовым СЧВ и наземным СЧВ после вычисления и учёта дрейфа. Для обработки в данном эксперименте использовался линейный метод наименьших квадратов Монте-Карло. Относительное отклонение α ожидаемого релятивистского эффекта от теоретически предсказанного составило: для GSAT0201 $\alpha_1 = (-0,77 \pm 2,73) \cdot 10^{-5}$ и для GSAT0202 $\alpha_2 = (-6,75 \pm 5,62) \cdot 10^{-5}$.

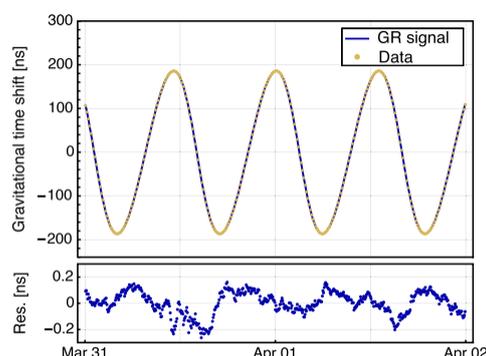


Рис. 7. Теоретический и измеренный гравитационные эффекты ухода бортовой шкалы времени СЧВ после удаления суточной составляющей линейного дрейфа и их разность

В результате, с учётом систематических мешающих эффектов, были подтверждены ожидаемые результаты по гравитационному замедлению времени бортовых шкал времени обоих спутников с относительной погрешностью порядка 10^{-5} . Рассматривая потенциальную будущую миссию того же типа, было бы интересно рассмотреть методы снижения влияния на точность измерений следующих мешающих факторов: нестабильности СЧВ, степени экранирования СЧВ, влияния магнитного поля путём моделирования или измерения его параметров, а также учёта негравитационных ускорений способом моделирования или прямым измерением их величины.

Планируемый эксперимент ACES с атомными СЧВ на борту Международной космической станции (МКС)

Европейское космическое агентство запланировало проведение на Международной космической станции эксперимента ACES (Atom Clock Ensemble in Space), одной из задач которого является измерение разности гравитационных потенциалов между орбитальным и наземными СЧВ [24]. В качестве орбитальных хранителей времени будут использованы цезиевые СЧВ (PHARAO) фонтанного типа с нестабильностью 10^{-16} – 10^{-17} , а также активный водородный СЧВ, разработанный швейцарской фирмой Spectratime. Он способен обеспечить краткосрочную и среднесрочную стабильности $2,1 \cdot 10^{-16}$ на 1000 с и $1,5 \cdot 10^{-15}$ на 10 с соответственно. В эксперименте предполагается измерение частотных и временных релятивистских смещений, для чего предусматривается участие мировой сети высокоточных микроволновых и квантово-оптических средств.

Стандарт частоты PHARAO является цезиевым стандартом фонтанного типа. В условиях микрогравитации скорость атомов вдоль оси трубки постоянна и может быть выбрана от 5 до 500 см/с. Следовательно, возможно сужение линии так называемого часового перехода, ширина которой обратно пропорциональна времени прохождения атомов между двумя резонаторами.

Водородный СЧВ разработан компанией Spectratime (Швейцария). Характеристики водородных СЧВ не зависят от условий микрогравитации (невесомости). Планируется получить относительную погрешность измерений гравитационных смещений на уровне $\alpha = 50 \cdot 10^{-6}$ для интервала измерения около 300 с, а при работе PHARAO — до $\alpha = 2 \cdot 10^{-6}$.

Мобильные оптические стандарты частоты (ОСЧ) и релятивистские эксперименты на их основе

В настоящее время за рубежом стационарные оптические стандарты частоты (ОСЧ) созданы в нескольких странах (таблица 7). Вместе с тем из этой же таблицы следует, что мобильные ОСЧ, пригодные для релятивистских экспериментов между разнесёнными точками на поверхности Земли, созданы лишь в Германии (институт РТВ; ОСЧ на холодных атомах стронция с относительной нестабильностью 10^{-17} [25]), а также в Японии (Токийский университет; ОСЧ на холодных атомах стронция с относительной нестабильностью 10^{-18} [26]).

Таблица 7

Состояние разработок СЧВ за рубежом

Уровень точности	Состояние разработок СЧВ	Разработчик
10^{-17}	Создан стационарный и мобильный ОСЧ на холодных атомах стронция	РТВ (Германия)
10^{-18}	Создан стационарный стандарт частоты на иттербии, ртути, алюминии, стронции. Присуждена Нобелевская премия 2012 г.	NIST, Университет штата Колорадо (США)
10^{-18}	Созданы стационарный и мобильный ОСЧ на атомах стронция	Токийский университет (Япония)
10^{-19} – 10^{-20}	Ведётся разработка ядерных стандартов частоты	РТВ (Германия), МИФИ (РФ), Мичиганский университет (США), Австрия, Австралия и др.

Европейский релятивистский эксперимент по измерению разности высот с помощью стронциевых и иттербиевых ОСЧ

Измерения гравитационного смещения частоты с помощью мобильных ОСЧ, которые могут быть использованы в интересах квантового нивелирования, были выполнены в Подземной лаборатории Модана (LSM) во Франции и лаборатории Итальянского метрологического института в Турине (INRiM) [25]. Разность высот между двумя лабораториями составляет примерно 1000 м, что соответствует абсолютному гравитационному смещению частоты примерно 48 Гц. При проведении эксперимента мобильные ОСЧ со стронциевой

(^{87}Sr) оптической решёткой (РТВ, Германия) были помещены в подземную лабораторию LSM. В INRiM размещались цезиевый СЧВ фонтанного типа и иттербиевый ОСЧ. Стронциевый и иттербиевый ОСЧ были синхронизированы по волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) длиной 150 км (рис. 8). Теоретическая разность потенциалов между LSM и INRiM определялась с помощью ГНСС и модели геоида. Красной линией на рис. 8 показано ожидаемое изменение частоты «часового» перехода в стронциевом ОСЧ из-за гравитационного смещения частоты.

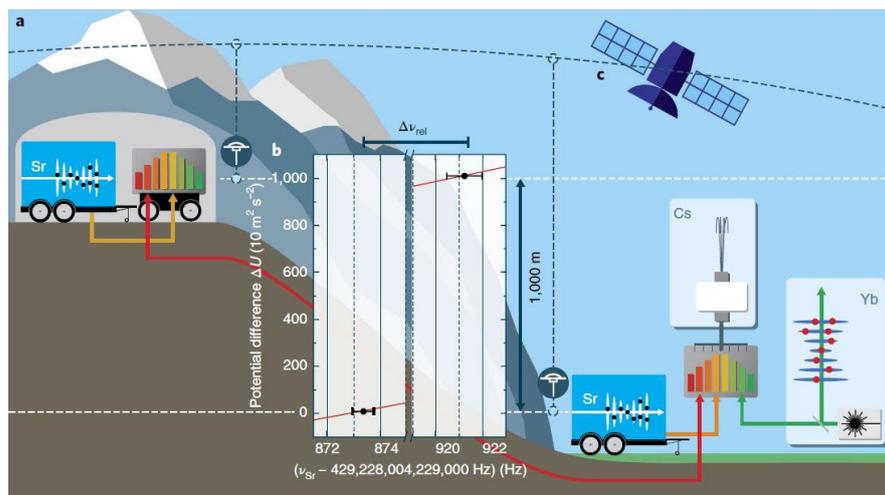


Рис. 8. Схема эксперимента по измерению гравитационного смещения частоты с помощью ОСЧ

После измерений мобильный стронциевый ОСЧ был перемещён в INRiM для устранения постоянного сдвига частоты между двумя ОСЧ.

При обработке результатов измеренное значение гравитационного смещения частоты совпало с ожидаемым (48 Гц), а соответствующая разность гравитационных потенциалов между точками измерений составила $10034 \pm 87 \text{ м}^2/\text{с}^2$. Данный результат согласуется с разностью потенциалов, полученной с помощью спутникового нивелирования (на основе НАП ГНСС и модели геоида), которая составила $10032,1 \pm 0,8 \text{ м}^2/\text{с}^2$.

Токийский эксперимент по квантовому нивелированию

Эксперимент по измерению гравитационного смещения частоты и разности ортометрических высот был выполнен в Токио с использованием пары мобильных ОСЧ на ультрахолодных атомах стронция, одни из которых размещались на Земле, другие — в телевысательной башне на высоте 450 м (рис. 9). Мобильные ОСЧ состоят из трёх стоек, две из которых включают лазеры, оптику и управляющую электронику [26].

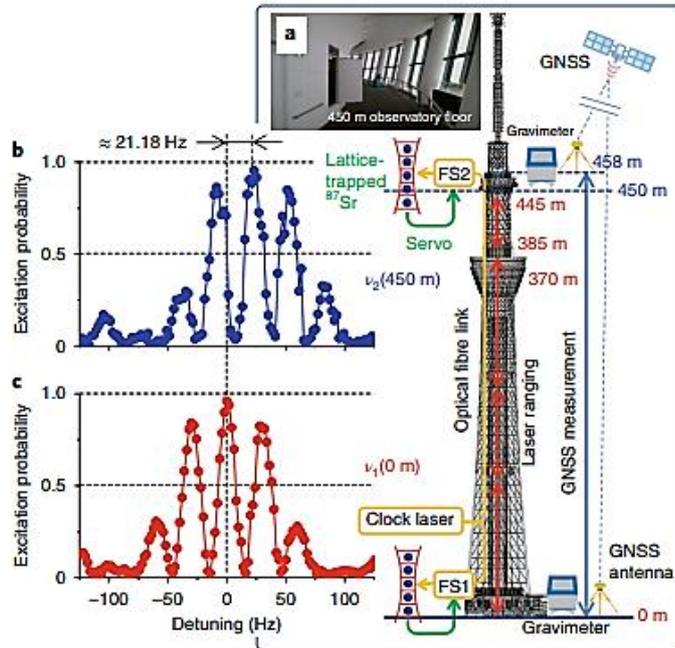


Рис. 9. Схема измерения разности гравитационных потенциалов с помощью ОСЧ на телевышке

Во время работы ОСЧ на высоте 0 и 450 м разность гравитационных потенциалов между ними определялась с помощью измерений НАП ГНСС, лазерного дальномера, лазерного нивелира и гравиметра. Высоты от 0 до 370 м и от 385 до 445 м непрерывно контролировались с помощью лазерного дальномера. Оставшиеся 25 м периодически измерялись с помощью лазерного дальномера и нивелира. На рис. 9 показаны спектры Рэмси для мобильного ОСЧ на земле и на высоте 450 м. Частотный сдвиг составил 21,18 Гц, и он соответствует гравитационному частотному сдвигу для тактовой частоты 429,228 ТГц при разности высот около 450 м. Чтобы уменьшить неопределённость в измерениях гравитационного смещения частоты, оба ОСЧ находились в одинаковых условиях по температуре.

При сличении двух ОСЧ на одной высоте разность частот составила $\Delta f/f_1 = (-0,3 \pm 4,7) \cdot 10^{-18}$, а при разности высот 452,65 м относительная разность частот составила $\Delta f/f_1 = (-49337,8 \pm 4,3) \cdot 10^{-18}$. При этом разность гравитационных потенциалов, измеренная с помощью лазерного дальномера, составила $g_{\text{cp}} \Delta h/c^2 = (49337,1 \pm 1,4) \cdot 10^{-18}$ при разности высот $\Delta h = 452,65 \pm 0,013$ м и $g_{\text{cp}} = 9,797248 \pm 2,4 \cdot 10^{-5}$ м/с². Такая большая погрешность измерения g_{cp} вызвана колебаниями башни при измерениях на высоте 450 м, что соответствует погрешности $\delta g_{\text{cp}} \Delta h/c^2 \approx 10^{-19}$. Сезонные и долгосрочные измерения силы тяжести составляют менее 0,01 мГал в год, что значительно меньше погрешности измерения. Масса башни влияет на измерение силы тяжести на 0,1 мГал, что также меньше погрешности измерения.

Таким образом, в Японии разработаны мобильные оптические стандарты частоты, способные к измерению разности ортометрических высот на сантиметровом уровне. В настоящий момент это самый высокоточный наземный эксперимент по подтверждению гравитационного смещения частоты.

Ядерно-оптический стандарт частоты

Низколежащий изомерный уровень в ядре ^{229}Th является уникальным явлением для ядерной физики. Обладая большим временем жизни (несколько часов) и аномально низкой для ядерных переходов энергией (длина волны — 160 нм), изомерный уровень в ядре ^{229}Th находится в диапазоне, доступном для прецизионной лазерной спектроскопии [27]. Данное обстоятельство делает возможным использование этого ядерного перехода в качестве часового осциллятора при создании оптического стандарта частоты. При этом, поскольку ядро экранировано электронными оболочками и гораздо менее чувствительно к внешним возмущениям (электрическим полям, столкновениям и пр.), оценочная неопределённость воспроизведения частоты в ядерном варианте может достигать значений лучше 10^{-17} . Теоретическая оценка бюджета неопределённости таких «ядерных часов» и вовсе даёт беспрецедентное значение на уровне 10^{-19} – 10^{-20} , что превосходит по точности самые современные аналоги на ультрахолодных атомах и ионах [28].

В настоящее время над созданием ядерного стандарта частоты активно работают передовые исследовательские группы в США (NIST, Los Alamos National Laboratory, Lawrence Livermore National Laboratory, Georgia Institute of Technology, University of California, Los Angeles) и Германии (Physikalische Technische Bundesanstalt, Ludwig-Maximilians-Universität München), а также ряд других организаций в Западной Европе и Австралии. В 2015 году в рамках FET-проекта (Future and Emerging Technologies) в странах ЕС с участием США создан европейский консорциум «*nuClock*», направленный на разработку ядерного стандарта частоты. В рамках данного консорциума за 2015–2019 гг. подготовлена вся необходимая научно-техническая база и инфраструктура. Единственным фактором, сдерживающим экспериментальную реализацию ядерного стандарта частоты, является отсутствие методики возбуждения ядерного изомерного перехода в изотопе ^{229}Th и, как следствие, отсутствие надёжных данных по точным значениям его энергии и времени жизни.

На территории Российской Федерации экспериментальные работы в этом направлении ведутся ФИАН и НИЯУ МИФИ, теоретические разработки проводятся во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева. Ведётся разработка мобильных ОСЧ на ^{171}Yb [29] и одиночном ионе $^{171}\text{Yb}^+$ [30]. В перспективе возможно создание мобильных стандартов частоты на ^{229}Th [31].

Выводы

Российские релятивистские эксперименты с перевозимыми водородными квантовыми часами ПКЧВ и ПКЧ-Н показали принципиальную возможность создания квантовых нивелиров на основе измерения эффекта гравитационного замедления времени. При этом экспериментально доказано, что на основе сравнения шкал времени двух высокостабильных водородных хранителей времени открывается возможность определения разности гравитационных потенциалов и разности ортометрических высот в глобально разнесённых точках. Точность измерений определяется степенью относительной нестабильности частоты задающего генератора микроволнового (водородного, рубидиевого и др.) хранителя времени, которая составляет 10^{-15} – $5 \cdot 10^{-16}$ и пока недостаточна для практического применения. Измерение гравитационного смещения частоты на частоте задающего генератора также пока не обеспечивает требуемой точности по причине недостаточной стабильности задающей частоты.

Вместе с тем при использовании гравитационного эффекта замедления времени измеряемое полезное расхождение шкал двух СЧВ тем больше, чем больше интервал наблюдения. Это открывает возможность повышения точности измерений за счёт статистической обработки наблюдений на длительных интервалах времени. В целом микроволновые квантовые часы будут востребованы при решении геодезических задач уже при их относительной нестабильности 10^{-16} .

Оптические стандарты частоты с использованием оптических решёток на холодных атомах стронция и иттербия продемонстрировали рекордные на сегодняшний день значения относительной нестабильности частоты на уровне 10^{-17} – 10^{-18} . Эти стандарты могут использоваться для измерения гравитационного смещения частоты и пригодны для создания стационарных оптических квантовых нивелиров на основе ВОЛС. Уже сейчас они способны обеспечить начальные измерения разности ортометрических высот с погрешностью 20–30 см, а также обеспечить последующий мониторинг изменений этого геодезического параметра в сети ВОЛС. Вместе с тем стационарный вариант изготовления ОСЧ ограничивает области их практического применения. В мобильном же варианте эти устройства ещё являются слишком громоздкими, и при работе вне лаборатории наблюдается ухудшение характеристик стабильности. Кроме того, ОСЧ пока не могут работать непрерывно в течение продолжительного времени.

Другой недостаток ОСЧ заключается в невозможности измерения гравитационного эффекта замедления и, соответственно, разности потенциалов и высот, поскольку на их основе создание высокостабильных хранителей шкал времени с нестабильностью 10^{-17} пока невозможно. Опыт применения микроволновых СЧВ для измерения этого эффекта показал большие возможности такого типа квантовых нивелиров.

В целом для создания сети «Квантовый футшток» на основе оптических и микроволновых квантовых нивелиров необходимо разработать мобильные стандарты частоты и мобильные хранители времени с нестабильностью лучше 10^{-17} . При такой нестабильности комплексное использование микроволновых и оптических стандартов обеспечит работу сети «Квантовый футшток» как в режиме начального измерения, так и в режиме мониторинга изменений разности потенциалов и высот.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ
в рамках научного проекта № 19-29-11023.*

Список литературы

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. — М.: Наука, 1967. — 460 с.
2. Фатеев В.Ф. Релятивистская метрология околоземного пространства-времени: монография. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2017. — 439 с.
3. Müller J., Dirkx D., Kopeikin S.M. et al. High Performance Clocks and Gravity Field Determination // Space Science Reviews. — 2018. — V. 214. — P. 5.
4. Фатеев В.Ф. Релятивистская теория и применение квантового нивелира и сети «Квантовый футшток» // Альманах современной метрологии. — 2020. — № 3 (23). — С. 11–52.
5. Постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2016 г. № 289 г. Москва «Об утверждении Положения о государственной геодезической сети и Положения о государственной нивелирной сети».
6. Овсянников В.Д., Пальчиков В.Г., Катори Х. Новые стратегии в разработке оптических стандартов частоты, основанных на использовании оптических решёток // Альманах современной метрологии. — 2015. — № 2. — С. 19–42.
7. Сысоев В.П., Самохвалов Ю.С., Грачев Н.М., Королев В.П., и др. Перевозимые квантовые часы на основе активного водородного генератора // Метрология времени и пространства. Доклады 6-го Международного симпозиума, 17–19 сентября 2012, Менделеево. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2013. — С. 126–139.
8. Сысоев В.П., Самохвалов Ю.С., Овчинников С.Н., Нестеров Н.И., Грачев Н.М., Алексеев М.И., Нагирный В.П., Шаталов А.А. Разработка перевозимых квантовых часов водородных нового поколения // Альманах современной метрологии. — 2020. — № 1 (21). — С. 116–125.
9. Блинов И.Ю., Смирнов Ю.Ф., Смирнов Ф.Р. Состояние и перспективы развития транспортируемых эталонов единиц времени и частоты // Вестник метролога. — 2018. — № 3. — С. 3–7.
10. Смирнов Ф.Р., Жариков А.И. Эталон-переносчик нового поколения для высокоточного сравнения шкал времени // Альманах современной метрологии. — 2018. — № 15. — С. 17–30.

11. Стандарт частоты и времени водородный Ч1-76А // АО «ФНПЦ «ННИПИ «Кварц» имени А.П. Горшкова» [сайт]. — URL: <http://www.kvarz.com/general/ch1-76a.html>.
12. Скворцов М.Н., Игнатович С.М., Вишняков В.И. и др. Миниатюрный квантовый стандарт частоты на основе явления когерентного пленения населённых в парах атомов ^{87}Rb // Квантовая электроника. — 2020. — 50 (6). — С. 576–580.
13. Мигунов А.И., Пальчиков В.Г., Барышев В.Н. Теоретические оценки формы КПН-резонатора в миниатюрных атомных часах // Альманах современной метрологии. — 2017. — № 11. — С. 121–149.
14. Фатеев В.Ф., Сысоев В.П., Рыбаков Е.А. Экспериментальное измерение гравитационного эффекта замедления времени с помощью перевозимых квантовых часов // Измерительная техника. — 2016. — № 4. — С. 41–43.
15. Фатеев В.Ф., Жариков А.И., Сысоев В.П., Рыбаков Е.А., Смирнов Ф.Р. Об измерении разности гравитационных потенциалов Земли с помощью перевозимых квантовых часов // Доклады Академии наук. — 2017. — Т. 472. — № 2.
16. Фатеев В.Ф., Рыбаков Е.А., Смирнов Ф.Р. Метод релятивистской синхронизации мобильных атомных часов и его экспериментальная проверка // Письма в ЖТФ. — 2017. — Т. 43. — № 10. — С. 3–11.
17. Фатеев В.Ф., Рыбаков Е.А. Экспериментальная проверка квантового нивелира на мобильных квантовых часах // Доклады Академии наук. Физика, технические науки. — 2020. — Т. 495. — С. 34–37.
18. Фатеев В.Ф., Смирнов Ю.Ф., Жариков А.И., Рыбаков Е.А., Смирнов Ф.Р. Эксперимент по повышению точности передачи шкалы времени на основе метода релятивистской синхронизации // Письма в ЖТФ. — 2020. — Т. 46. — № 22.
19. Vessot R.F.C., Levine M.W. A test of the equivalence principle using a spaceborne clock // General Relativity and Gravitation. — 1979. — 10. — P. 181–204.
20. Active On-Board Hydrogen Maser for Radioastron Space Mission VCH-1010 // “VREMYA-CH” JS COMPANY [website]. — URL: <https://www.vremya-ch.com/english/product/index6e49.html?Razdel=8&Id=39>.
21. Nunes N., Bartel N., Bietenholz M. et al. The gravitational redshift monitored with RadioAstron from near Earth up to 350,000 km // Adv. Space Res. — 2020. — 65 (2). — P. 790–797.
22. Biriukov A.V., Kauts V.L., Kulagin V.V. et al. Gravitational redshift test with the space radio telescope “RadioAstron” // Astronomy Reports. — 2014. — 58. — P. 783–795.
23. Herrmann S., Finke F., Lulf M. Test of the Gravitational Redshift with Galileo Satellites in an Eccentric Orbit // Phys. Rev. Lett. — 2018. — V. 121.

24. Cacciapuoti L., Salomon C. Atomic Clock Ensemble in Space // Journal of Physics Conference Series. — 2011. — V. 327.
25. Grotti J., Koller S., Vogt S. et al. Geodesy and metrology with a transportable optical clock // Nature Phys. — 2018. — 14. — P. 437–441.
26. Takamoto M., Ushijima I., Ohmae N. et al. Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks // Nat. Photonics. — 2020. — 14. — P. 411–415.
27. Карпешин Ф.Ф., Тржасковская М.Б. Изомерная линия ^{229}Th как репер высокоточного стандарта частоты // Измерительная техника. — 2016. — № 7. — С. 29–32.
28. Kazakov G.A. et al. Performance of a ^{229}Th Thorium solid-state nuclear clock // New Jour. Phys. — 2012. — 14. — 083019.
29. Белотелов Г.С., Сутырин Д.В., Слюсарев С.Н. На пути к мобильному оптическому стандарту частоты на нейтральных атомах иттербия // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. — 2019. — Т. 6. — Вып. 1. — С. 24–31.
30. Zalivako I. et al. Towards compact transportable optical clock based on $^{171}\text{Yb}+$ // European Frequency and Time Forum (EFTF). — 2018.
31. Wense L., Seiferle B., Thirolf P.G. Towards a ^{229}Th -based nuclear clock // Measurement Techniques. — 2018. — V. 60. — 1178.

Статья поступила в редакцию: 26.10.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 14.01.2022 г.

Статья принята в работу: 21.01.2022 г.